

文章编号: 1001-0920(2004)09-1013-04

基于滑模方法的桥式吊车系统的抗摆控制

王 伟, 易建强, 赵冬斌, 刘殿通

(中国科学院 自动化研究所 复杂系统与智能科学重点实验室, 北京 100080)

摘 要: 针对桥式吊车这类欠驱动系统, 提出一种基于滑模控制的抗摆方法. 该方法将系统状态分成两组, 构造出一种双层滑动平面. 结合桥式吊车系统数学模型的特点, 求取了总的滑模控制量并进一步设计了控制器的参数. 采用 Lyapunov 方法, 从理论上证明了各级滑动平面的稳定性. 仿真结果验证了该方法对于桥式吊车系统抗摆控制的有效性.

关键词: 桥式吊车; 抗摆控制; 滑模控制; 欠驱动系统

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Anti-swing control of overhead cranes based on sliding-mode method

WANG Wei, YI Jian-qiang, ZHAO Dong-bin, LIU Dian-tong

(Laboratory for Complex Systems and Intelligence Science, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China. Correspondent: WANG Wei, E-mail: w.wang@mail.ia.ac.cn)

Abstract: An anti-swing controller based on sliding-mode method for overhead crane which belongs to a kind of underactuated systems is presented. The system states are divided into two parts and a kind of two-layer sliding plane is constructed. Using the features of the mathematical model of overhead cranes, the sliding-mode control law is derived and further the parameters of the controller are designed. Using Lyapunov method, the stability of all sliding plane is proved theoretically, and the simulation results show the validity of this method for the anti-swing control of overhead cranes.

Key words: overhead crane; anti-swing control; sliding-mode control; underactuated system

1 引 言

桥式吊车作为一种重要的起重运输机械, 在工业生产中得到了广泛的应用. 对于桥式吊车的控制, 往往要求对控制精度、速度以及抗摆等方面进行综合考虑. 台车水平方向上的移动直接受电机的控制, 因此台车移动的速度和精度控制是较易实现的. 相对而言, 吊车系统的抗摆控制往往难于实现. 负载的摆动主要是由于加速、减速以及外界干扰而引起的, 抗摆控制对于吊车运行的安全性往往是至关重要的.

目前, 关于桥式吊车系统的研究已经很多. 文献 [1] 提出了桥式吊车系统的次最小时间控制, 采用 Lyapunov 方法给出了基于对象模型的抗摆控制策略; [2] 采用最小时间控制的思想, 将 bang-bang 控制中的一组切换时间值定义成一个新的变量, 并通过模糊控制来寻找一组最优的切换时间序列; [3] 研究的是一种线性时变的吊车模型, 同样采用了最优控制策略, 并针对对象变参数的特点提出一种变反馈增益的状态反馈控制法. 目前, 智能控制在吊车系统中也有一定的应用^[4,5].

收稿日期: 2003-09-22; 修回日期: 2004-02-09

作者简介: 王伟(1977—), 男, 北京人, 博士生, 从事欠驱动系统、滑模控制等研究; 易建强(1963—), 男, 江西萍乡人, 研究员, 博士生导师, 从事智能控制、机器人等研究.

对于吊车系统的研究,往往只局限于某一具体的方面 例如有的只研究吊车运输的快速性,而忽略了现场的安全性;有的只研究吊车系统的抗摆控制,而忽略了外界的扰动(对于港口码头这类室外应用场合,考虑外界的扰动往往是至关重要的).即使最简单的桥式吊车,也属于欠驱动控制系统,要想通过一个电机来同时实现水平移动、抗负载摆动和抗外加干扰,通常是相当困难的 滑模控制具有对外界扰动不变性的特点,因此滑模控制方法适合于实现吊车系统的抗摆控制

文献[8]提出一种分层模糊滑模控制方法,它将一个非线性系统分成若干个子系统,以渐近稳定性为性能指标来设计模糊自适应律,从而保证各个子系统之间的相互解耦 该方法在非线性和解耦方面是一个很好的尝试,但在构造分层滑动面时却出现了右半平面的极点,即滑动平面不满足霍尔维茨多项式条件,这样必须采用模糊滑动面来不断调整 因此该方法部分丧失了滑模控制对外界扰动不变性的特点

本文基于滑模方法提出一种抗摆控制器,该控制器具有双层滑动平面结构,结合吊车系统的特点,可求取总的滑模控制量,在保证稳定的前提下进一步确定该滑模控制器参数 这种基于滑模方法的抗摆控制器具有滑模控制抗外界干扰的优点,而且可实现水平距离与摆角的同时控制 本文不仅从理论上证明了各级滑动平面的稳定性,而且通过仿真实验验证了该结果

2 桥式吊车系统的数学模型

考虑一个平面桥式吊车模型,其结构如图1所示 假设台车和负载可看作质点,并且一直处于 $x-y$ 平面内运动;同时忽略台车与轨道之间的摩擦力以及绳索长度 L 的变化 利用欧拉-拉格朗日方程可

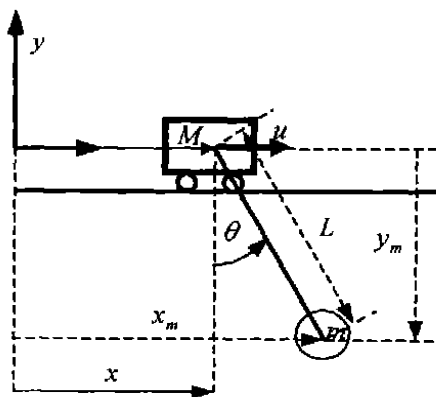


图1 桥式吊车系统

求得吊车系统的数学模型如下:

$$x: (m + M)\ddot{x} + mL(\ddot{\theta}\cos\theta - \dot{\theta}^2\sin\theta) = u, \quad (1)$$

$$\theta: x\ddot{\theta}\cos\theta + L\ddot{\theta} + g\sin\theta = 0 \quad (2)$$

其中: M 表示台车的质量, m 表示负载的质量, x 表示台车的水平位移, θ 表示绳索的摆角, L 为绳长

令 $x_1 = x, x_2 = \dot{x}, x_3 = \theta, x_4 = \dot{\theta}$ 分别为吊车系统中的台车水平移动距离,台车的水平速度,连接负载的绳索与垂直方向的摆角以及负载的角速度 则桥式吊车的状态方程可写成如下形式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = x_2(t), \\ \dot{x}_2(t) = g_1(X) + b_1(X)u(t) + d_1(t), \\ \dot{x}_3(t) = x_4(t), \\ \dot{x}_4(t) = g_2(X) + b_2(X)u(t) + d_2(t), \\ y(t) = [x_1(t), x_3(t)]^T. \end{cases} \quad (3)$$

其中: $g_1(X), g_2(X), b_1(X), b_2(X)$ 为非线性函数; $d_1(t)$ 和 $d_2(t)$ 为有界的外部扰动和系统参数扰动项; $u(t)$ 为系统的控制输入 针对吊车系统, g_1, b_1, g_2, b_2 分别为

$$g_1 = \frac{mL\ddot{\theta}\sin\theta + mg\sin\theta\cos\theta}{M + m\sin^2\theta},$$

$$b_1 = \frac{1}{M + m\sin^2\theta} \quad (4)$$

$$g_2 = -\frac{(m + M)g\sin\theta + mL\ddot{\theta}\sin\theta\cos\theta}{(M + m\sin^2\theta)L},$$

$$b_2 = -\frac{\cos\theta}{(M + m\sin^2\theta)L}. \quad (5)$$

针对桥式吊车的数学模型,可得出如下结论:

- 1) 对于任意的状态值恒有 $b_1 > 0$;
- 2) 当 $\theta \in \left[-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}\right]$ 时,有 $b_2 < 0$

3 滑模抗摆控制器设计

按照式(3)的桥式吊车系统模型进行滑模控制器的设计,首先作如下假设:

- 1) 存在正数 g_{1M}, g_{2M} ,使得 $|g_1(X)| \leq g_{1M}, |g_2(X)| \leq g_{2M}$;
- 2) 外界干扰项是可观测的且有界,即存在已知正数 d_{1M}, d_{2M} ,使得 $|d_1(t)| \leq d_{1M}, |d_2(t)| \leq d_{2M}$.

将系统的状态分成两组来设计滑动平面 s_1 和 s_2 ,即

$$s_1 = c_1x_1 + x_2, s_2 = c_2x_3 + x_4 \quad (6)$$

采用等效控制法分别求取各个子系统在滑动平面上的等效控制量 u_{eq1} 和 u_{eq2} ,即

$$u_{eq1} = -\frac{g_1(X) + c_1x_2 + d_1}{b_1},$$

$$u_{eq2} = -\frac{g_2(X) + c_2x_4 + d_2}{b_2}. \quad (7)$$

桥式吊车系统是一种典型的欠驱动系统, 因此采用一个控制量来实现水平移动以及抗摆控制有一定困难 为此构造第二级滑动平面 S , 通过它来实现两组被控状态的联系, 即

$$S = \alpha s_1 + \beta s_2 \quad (8)$$

这里: α 为正常数, β 为根据系统状态来选择得常数 取系统总的控制量

$$u = u_{eq} + u_{sv} = (\alpha b_1 + \beta b_2)^{-1} [\alpha(c_1 x_2 + g_1 + d_1) + \beta(c_2 x_4 + g_2 + d_2) + \eta \text{sgn}(s_1)] - kS. \quad (9)$$

这里: u_{sv} 为系统在趋近阶段的切换控制分量, η 和 k 分别为正的常系数 令

$$K_1 = \sup_t |u_{eq2} - u_{eq1}| \quad (10)$$

这里控制器的各个参数满足如下条件:

$$\beta = \begin{cases} \beta_0, s_1 s_2 > 0, \\ -\beta_0, s_1 s_2 < 0, \end{cases} \beta_0 > 0; \quad (11)$$

$$\alpha > \frac{\beta_0 |b_2|}{b_1}, \beta_0 > 0; \quad (12)$$

$$\eta > |\beta| |b_2| K_1. \quad (13)$$

4 稳定性分析

定理 1 对于式(3)所示非线性系统, 按照式(6)和(8)的方式构造具有双层结构的滑动平面 如果控制量采用式(9)所示形式, 且控制器参数满足式(11)和(12)的条件, 则对于第二层滑动平面 S 是稳定的(存在且可达).

证明 对于第二层滑动平面 S , 构造 Lyapunov 能量函数 $V = \frac{1}{2} S^2$, 对 V 求时间的导数, 有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S \dot{S} = S(\alpha \dot{s}_1 + \beta \dot{s}_2) = \\ &S[\alpha(c_1 x_2 + g_1 + b_1 u + d_1) + \beta(c_2 x_4 + g_2 + d_2 + b_2 u)] = \\ &- \eta \alpha |s_1| - \eta \beta |s_2| \text{sgn}(s_1 s_2) - (\alpha b_1 + \beta b_2) k S^2. \end{aligned} \quad (14)$$

由于 η, α, k 均为正实数, 如果 β 满足式(11)的条件, α 满足式(12)的条件, 式(14)则变成如下形式:

$$\dot{V} = S \dot{S} = -\eta \alpha |s_1| - \eta |\beta| |s_2| - (\alpha b_1 + \beta b_2) k S^2 < 0 \quad (15)$$

因此, 对于第二层滑动平面 S 是稳定的(存在且可达).

定理 2 对于式(3)所示非线性系统, 按照式(6)和(8)的方式构造具有双层结构的滑动平面 如果控制量采用式(9)的形式, 且控制器参数满足式(11)~(13)的条件, 则对于第一层滑动平面 s_1 同

样是稳定的(存在且可达).

证明 对于第一层子系统的滑动平面 s_1 , 构造 Lyapunov 能量函数 $V_1 = \frac{1}{2} s_1^2$, 对 V 求时间导数, 有

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= s_1 \dot{s}_1 = s_1(c_1 x_2 + g_1 + b_1 u + d_1) = \dots = \\ &\frac{b_1}{\alpha b_1 + \beta b_2} [b_2(u_{eq2} - u_{eq1}) \beta s_1 - \eta |s_1|] - k^* (\alpha s_1^2 + \beta s_1 s_2). \end{aligned} \quad (16)$$

这里 $k^* = b_1 k$. 式(12)保证了 $\alpha b_1 + \beta b_2 > 0$, 由 $b_1 >$

0 可得 $\frac{b_1}{\alpha b_1 + \beta b_2} > 0$ 所以(16)可化为

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= s_1 \dot{s}_1 = \\ &\frac{b_1}{\alpha b_1 + \beta b_2} [\beta s_1 b_2 (u_{eq2} - u_{eq1}) - \eta |s_1|] - k^* \alpha s_1^2 - k^* \beta s_1 s_2 \\ &\frac{b_1}{\alpha b_1 + \beta b_2} (|s_1| |b_2| |\beta| K_1 - \eta |s_1|) - k^* \alpha s_1^2 = \\ &\frac{b_1}{\alpha b_1 + \beta b_2} |s_1| (|b_2| |\beta| K_1 - \eta - k^* \alpha s_1^2 - k^* \beta |s_1 s_2| \text{sgn}(s_1 s_2)). \end{aligned} \quad (17)$$

当控制器参数 η 满足式(13)的条件, β 满足式(11)的条件时, 可得到 $\dot{V}_1 < 0$ 因此, 对于第一层滑动平面 s_1 同样是稳定的(存在且可达).

定理 3 对于式(3)所示非线性系统, 按照式(6)和(8)的方式构造具有双层结构的滑动平面, 采用式(9)的控制量, 如果对于第一层滑动平面 s_1 以及第二层滑动平面 S 是稳定的, 则对于第一层滑动平面 s_2 同样是稳定的(存在且可达).

证明 由于已知第一层滑动平面 s_1 是稳定的, 即 s_1 存在且可达, 对于任意初始条件 s_{10} , 存在某一时间 $t_1 \in R^+$, 使得 $\lim_{t \rightarrow t_1} s_1 = 0$, 即 s_1 能在有限时间内到达零 同理, 对于第二层滑动平面 S , 由于它也是稳定的, 对于任意初始条件 S_0 , 存在某一时间 $t_2 \in R^+$, 使得 $\lim_{t \rightarrow t_2} S = 0$ 因此, 对于第一层滑动平面 s_2 , 存在某一时间 $T = \max(t_1, t_2)$, 使得对于初始条件 s_{20} , 有 $\lim_{t \rightarrow T} s_2 = \lim_{t \rightarrow T} \frac{1}{\beta} (S - \alpha s_1) = 0$ 所以第一层滑动平面 s_2 也是稳定的

注 1 定理 3 表明: 如果某一控制器能保证第一层滑动平面 s_1 以及第二层滑动平面 S 是稳定的, 则它也能实现对第一层滑动平面 s_2 的控制 对于吊车系统而言, 则说明这种滑模控制器能在实现水平移动的同时实现抗摆控制

注2 定理3对于第一层滑动平面 s_2 的稳定性证明是保守的,也就是说对于任意 $t < T$ 时刻,均可得到 s_2 收敛到零的结果,该结论是充分的,但是否在 $t < T$ 以前就能收敛到零,未加说明.实际上, s_2 除了可能随 s_1 或 S 同时收敛到零外,还有可能沿着曲面 $S = \alpha s_1$ 收敛到零,这时 s_2 的收敛速度要快于 s_1 或 S 的收敛速度.无论滑模运动的收敛速度如何, s_2 总是收敛的.

注3 对于桥式吊车系统,由于其摆角总是在平衡点附近变化,在设计抗摆控制器时往往可在平衡点附近进行近似线性化,从而方便对控制器参数范围进行估计.如假设绳索的摆角足够小,则有: $\cos \theta \approx 1, \sin \theta \approx \theta, \ddot{\theta} \approx 0$,因此 b_1 和 b_2 即变为常数, g_1 和 g_2 也可得到相应的简化.这样对于估计 K_1 则会相对简便.

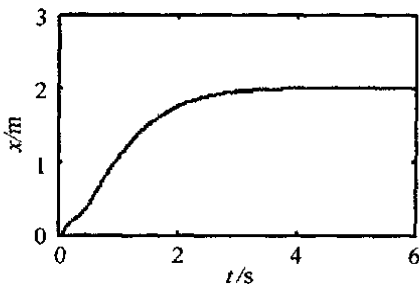
5 仿真分析

吊车系统的各个参数按文献[6]选取,分别为: $M = 1 \text{ kg}, m = 0.8 \text{ kg}, L = 0.305 \text{ m}$.对于滑模控制器,其参数分别为: $c_1 = 0.8, c_2 = 0.4, \alpha = 3.2, \beta_0 = 0.3, \eta = 0.43, k = 2$.

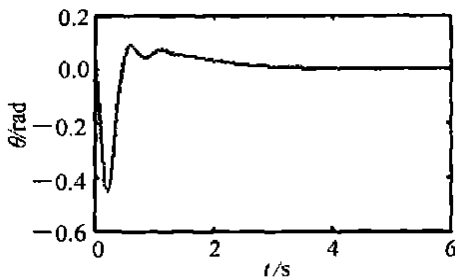
吊车系统的初始条件为 $X_0 = (0, 0, 0, 0)$,目标值为 $x^d = 2 \text{ m}, \dot{x}^d = 0, \theta^d = 0, \dot{\theta}^d = 0$.这里, θ^d 和 $\dot{\theta}^d$ 为摆角及角速度的目标值,控制目标是要求系统从最初的静止位置(对应于图1中 $x-y$ 平面的原点)运

动到目标位置($x = 2 \text{ m}$)处,同时要求实现抗摆(摆角及角速度均为零).

图2为吊车系统水平位移和摆角的输出曲线,可以看出台车能在较快的时间到达给定位置,且在到达期望值之前实现抗摆控制.图3给出了吊车系统控制力的输出曲线.图4是各级滑动平面的收敛曲线以及 β 的取值曲线.可以看出滑动平面 s_2 收敛速度较快,它首先收敛到零,然后 s_1 和 S 会以相同的速度同时收敛到零,仿真结果表明所有的滑动平面都是收敛的.图5给出了第一级滑动平面 s_1 的相平面图,从图中可以看出滑动平面的存在,并且系统的状态进入滑动平面后能保持在其上滑动,并最终趋近于零.



(a) 台车水平位移



(b) 负载摆角的输出曲线

图2 台车水平位移和负载摆角的输出曲线

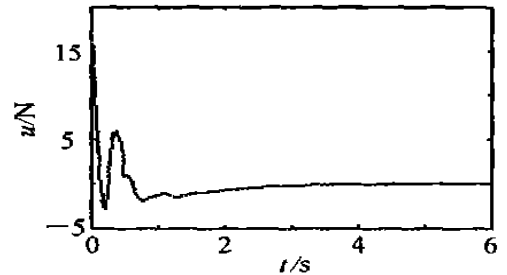


图3 吊车系统的控制力曲线

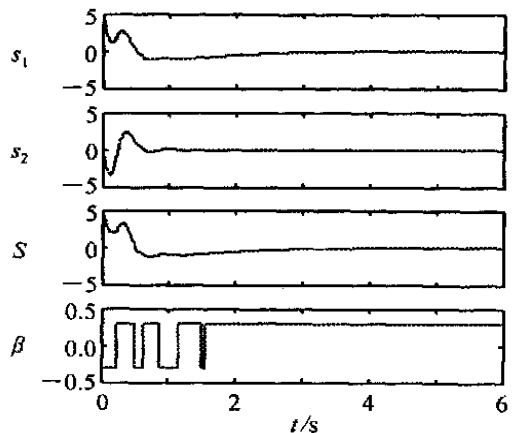


图4 s_1, s_2, S 收敛曲线和 β 取值曲线

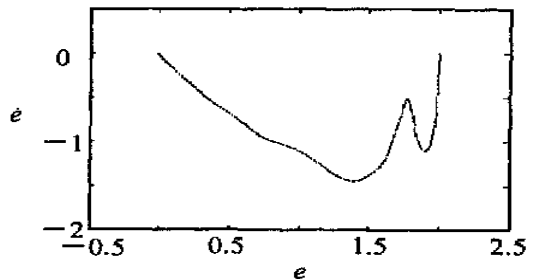


图5 第一级子系统滑动平面 s_1 的相平面

(下转第1021页)

350 多代,除碰撞惩罚项外都比前者大很多。而在搜索时间上,两者搜索相同的代数所需时间相差不大。由此可见理性遗传算法的合理性和有效性。

5 结 论

理性遗传算法通过在遗传进化过程中实时建立、反馈和利用遗传信息,模仿生物进化过程中生物个体对知识、经验的继承和学习,以克服传统遗传算法存在的收敛慢甚至早熟等问题。本文通过增加遗传信息的逻辑值,丰富了遗传信息的表达能力,并在此基础上建立了新的更一般化的理性交叉和变异算子,给出了理性遗传算法的一般算法结构。在理性遗传运算中融合了一般的局部搜索算法或对问题处理有特殊效果的先验规则。本文对所提出的理性遗传算子和理性遗传算法的有效性和全局收敛性进行理论分析,并针对水下移动机器人的运动规划问题作了具体的算法设计和应用。理论分析和仿真结果表明,所提出的理性遗传算法不仅具有较快的收敛速度,而且可以概率收敛到全局最优解。

(上接第 1016 页)

6 结 语

本文基于变结构的方法提出了一种桥式吊车系统的抗摆控制器。该方法可在实现系统快速定位的同时提供抗摆控制;同时由于采用了滑模控制,当系统状态进入滑动平面后,整个系统对外界的干扰具有较强的鲁棒性。仿真结果进一步验证了这种滑模控制方法的有效性。该方法对于欠驱动被控对象的控制是一种可行的解决方案。

参考文献(References):

- [1] Ho-Hoon Lee, Seung-Gap Choi. A model-based anti-swing control of overhead cranes with high hoisting speeds[A]. *Proc of the 2001 IEEE Int Conf on Robotics & Automation* [C]. Seoul, 2001. 2547-2552.
- [2] Myung S Moon, Hugh F VanLandingham, Yvan J Beliveau. Fuzzy time optimal control of crane load[A]. *Proc of the 35th Conf on Decision and Control* [C]. Kobe, 1996. 1127-1132.
- [3] Giorgio Corriga, Alessandro Giua, Giampaolo U sai. An implicit gain-scheduling controller for cranes[J]. *IEEE Trans on Control System s Technology*, 1998, 6

参考文献(References):

- [1] Zbigniew Michalewicz. *Genetic Algorithms + Datastructures = Evolution Programs* [M]. Berlin: Springer-Verlag Press, 1994.
- [2] 陈根社, 陈新海. 遗传算法的研究与进展[J]. *信息与控制*, 1994, 23(4): 215-222.
(Chen G S, Chen X H. Survey of Genetic Algorithms [J]. *Information and Control*, 1994, 23(4): 215-222.)
- [3] 刘勇, 康立山, 陈毓屏. 非数值并行算法——遗传算法[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [4] 张文修, 梁怡. 遗传算法的数学基础[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2000.
- [5] 景兴建, 王越超, 谈大龙. 理性遗传算法及其在多机器人运动协调中的应用[J]. *自动化学报*, 2002, 28(6): 955-961.
(JING X J, Wang Y C, Tan D L. Rational genetic algorithm and its application to motion planning of mobile robots[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(6): 955-961.)

(1): 15-20

- [4] J A Mendez, L A costa, L Moreno, et al. Design of a neural network based self-tuning controller for an overhead crane[A]. *Proc of the 1998 IEEE Int Conf on Control Application* [C]. Trieste, 1998. 167-171.
- [5] William Singhose, Lisa Porter, Michael Kenison, et al. Effect of hoisting on the input shaping control of gantry cranes[J]. *Control Engineering Practice*, 2000, 8(10): 1159-1165.
- [6] Yong-Seok Kim, Ham-Suk Seo, Seung-Ki Sul. A new anti-sway control scheme for trolley crane system [A]. *Conf Rec IEEE-IA S Annual Meeting* [C]. Chicago, 2001. 548-552.
- [7] Martin Gutierrez, Rogelio Soto. Fuzzy control of a scale prototype overhead crane[A]. *Proc on 37th IEEE Conf on Decision & Control* [C]. Tampa, 1998. 4266-4268.
- [8] Yi-Jen Mon, Chih-M in Lin. Hierarchical fuzzy sliding-mode control[A]. *The 2002 IEEE World Congress on Computational Intelligence* [C]. Honolulu. 2002. 656-661.